

第 21 卷第 2 期  
2001 年 3 月

环 境 科 学 学 报  
ACTA SCIENTIAE CIRCUMSTANTIAE

Vol. 21 ,No. 2  
Mar. ,2001

文章编号 :0253-2468 (2001)-02-0224-05

中图分类号 :X171

文献标识码 :A

# 红树林系统处理牲畜废水营养盐的研究

叶 勇<sup>1</sup>,谭凤仪<sup>2</sup>,卢昌义<sup>3</sup> (1. 宁波大学海洋生物工程重点实验室 宁波 315211;2. 香港城市大学生物及化学系 香港;3. 厦门大学环境科学研究中心,厦门 361005)

**摘要:**在 2 种盐度条件下(淡水与盐度 30 的人工海水)通过温室盆栽系统对比研究了 2 种主要红树植物木榄和秋茄对牲畜废水的处理效应。牲畜废水的加入使植物体 P 含量增加 1—4 倍,N 含量增加 0.04—1.30 倍。淡水条件下秋茄和木榄系统 N 的处理效率分别为 84.3 % 和 95.5 %,海水条件下则为 92.7 % 和 98.0 %。淡水条件下秋茄和木榄系统 P 的处理效率分别为 79.2 % 和 91.8 %,海水条件下则为 88.0 % 和 97.8 %。盐度对秋茄植物体 N 的去除无显著效应。2 种植物体对 P 的处理效率为 4 %,远比 N 的处理效率低。废水来源的营养盐大多被土壤去除。

**关键词:**木榄;秋茄;牲畜废水;营养盐

## Removal of livestock waste water nutrient by mangrove systems

YE Yong<sup>1</sup>, TAN Fengyi<sup>2</sup>, LU Changyi<sup>3</sup> (1. Marine Biotechnology Key Lab, Ningbo University, Ningbo, 315211; 2. Department of Biology and Chemistry, City University of Hong Kong, Hong Kong; 3. Environmental Science Research Centre, Xiamen University, Xiamen, 361005)

**Abstract:** The present investigation compared the capacity of greenhouse pot-cultivation systems under two salinity conditions (freshwater and saline water) with two main mangrove species, *Bruguiera gymnorhiza* and *Kandelia candel*, to remove nutrients from livestock wastewater. The increasing times of P contents in plants receiving livestock wastewater were 1—4 times that of the controls, much more than those of N contents (0.04—1.30 times). The removal efficiencies of N nutrients from livestock wastewater were 84.3 % and 95.5 % respectively by *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza* pot-cultivation systems under freshwater condition and 92.7 % and 98.0 % under saline water condition. P nutrient removal efficiencies by *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza* systems under freshwater condition were 79.2 % and 91.8 % respectively and 88.0 % and 97.8 % under saline water condition. Salinity condition has no significant effect on the N nutrient removal by *Kandelia candel* plants. The P removal efficiencies by *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza* plants were less than 4 % and much lower than those of N. Under both salinity conditions, higher N/P absorption ratios by plants were found in *Bruguiera gymnorhiza* plants (11.64 and 10.64 under freshwater and saline water conditions respectively). Most of the nutrients retained to the systems due to the discharges of livestock wastewater were removed by soils. Most N nutrients retained in soils lost away from the systems.

**Key words:** *bruguiera gymnorhiza*; *Kandelia candel*; livestock wastewater; nutrient

自然湿地(包括红树林)和人工湿地被视为很多污染物廉价而有效的处理厂<sup>[1-3]</sup>。红树林湿地 N、P 含量低<sup>[1,4,5]</sup>,对于富含营养盐废水的处理可能特别有效。用红树林湿地处理废水时,红树林种类及生境的选取是重要的。有关红树林去除废水中营养盐的研究报道较少,主要集中于秋茄系统的研究<sup>[6,7]</sup>,且对于红树林生境的重要因子盐度对营养盐去除率的效应尚未充分认识。

红树林可生长在从完全海水到完全淡水的盐度环境<sup>[5]</sup>。Naidoo 研究表明仅在低盐度下外加 N 对水培木榄生长有促进作用<sup>[8]</sup>。由于生长速率与营养盐利用的差异,不同植物对营养盐的需求量有所不同<sup>[9]</sup>。有报道表明,红树林的自然分布与土壤结构及土壤营养盐含量有

收稿日期:2000-01-03;修订日期:2000-04-16

作者简介:叶 勇(1969—),男,博士

关<sup>[10,11]</sup>. 本研究的目的是比较木榄和秋茄温室盆栽系统的牲畜废水 N、P 营养盐处理能力. 另一目的为评价盐度对该处理效率的影响.

1 材料与方法

1.1 试验设计

1997 年 4 月从香港米埔红树林保护区采木榄成熟繁殖体种植于自动控温的玻璃温室内(气温为  $25 \pm 4$  )的塑料盆中,每盆种植 4 个繁殖体. 1998 年 11 月,从香港黄竹湾挖取 1.5 龄秋茄幼苗,每 3 棵种植于一个塑料盆中. 塑料盆直径 18 cm 高 20 cm,盛 4 kg 取于香港西径红树林的壤质沙土. 木榄繁殖体或移栽的秋茄幼苗入盆后至本试验开始,各盆每日浇 300 mL 自来水. 盆底有 6 个直径 0.6 cm 孔使水通过重力排出.

1999 年 3 月 3 日选取生长情况较为一致的 12 盆木榄和 12 盆秋茄开始牲畜废水处理试验,并于该日取土样作本底. 分析得知相同植物 12 个盆之间土壤营养盐含量无显著差异,秋茄盆土壤 N、P 含量分别为  $0.434 \pm 0.008$  和  $0.178 \pm 0.009$  mg/g ( $n = 12$ ),木榄盆分别为  $0.357 \pm 0.004$  和  $0.158 \pm 0.001$  mg/g ( $n = 12$ ). 取于香港打鼓岭养猪场的废水含较高的 P 而 N 含量较低(表 1). 试验前木榄基径和茎高分别为  $0.82 \pm 0.08$  cm 和  $24.2 \pm 3.2$  cm ( $n = 48$ ),秋茄基径  $0.64 \pm 0.05$  cm,茎高  $25.2 \pm 3.9$  cm ( $n = 36$ ).

表 1 废水、自来水和人工海水的特性  
Table 1 Characteristics of livestock wastewater ,tapwater and saline water

参数	废水	自来水	人工海水
pH	7.24(7.00—7.35)	7.64(7.10—8.03)	8.01(7.32—8.26)
电导率,mS/cm	1.39(1.14—1.77)	0.22(0.18—0.23)	36.60(34.83—38.49)
TOC,mg/L	65.9(48.1—88.3)	2.3(0.5—5.4)	5.2(2.1—7.0)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N,mg/L	36.1(21.2—58.7)	0.3(0—1.0)	1.9(0—5.9)
NH <sub>3</sub> -N,mg/L	<0.05	<0.05	<0.05
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P,mg/L	53.7(22.5—94.6)	0.2(0—0.5)	0.2(0—0.7)

注:括号外的数值为 9 个样品的平均值,括号内为测定值的范围

处理期间各盆每日浇灌 300 mL 处理液,各物种设 4 个处理,每处理 3 个重复:(1)淡水对照组(F)每日浇自来水;(2)淡水条件下废水处理组(FW)每 3 日浇一次废水,其余天数浇自来水;(3)海水对照组(S)每日浇盐度 30 的人工海水;(4)海水条件下废水处理组(SW)每 3 日浇一次废水,其余天数浇人工海水. 废水处理组每 3 日浇一次废水是为了模拟红树林现场废水处理时须在两个高潮期之间加入废水的情况. 为使各盆所处环境条件一致,处理期间随机排列各盆,每 2 个星期后重新随机排列一次. 所有处理持续 48 个周期即 144 天.

1.2 水、土壤和植物分析

每隔 6 个处理周期分析废水、自来水、人工海水和滤出液的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 含量. 处理结束时分析土壤可提取性无机 N、总 N 和总 P 以及植物生理量与 N、P 含量. 所有化学分析均按标准方法进行<sup>[12]</sup>.

1.3 数据分析

用 2-way ANOVA(双因素变量分析)分析盐度与废水对土壤营养盐水平以及植物 N、P 含量的影响及其相互作用. 平均值差异水平以 Student-Newman-Keuls 法判定.

2 结果与讨论

2.1 渗滤液化学特性

牲畜废水处理组渗滤液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量木榄系统普遍低于秋茄系统(图 1). 第一个处理周期 2 系统 2 种盐度条件下废水处理组渗滤液  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  含量接近且很低(图 2). 第 6 个处理周期后海水废水处理组低于淡水废水处理组,说明红树林生培盐度可促进  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除. 木榄红树林比秋茄红树林处理  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的能力强,这与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的情况相同.

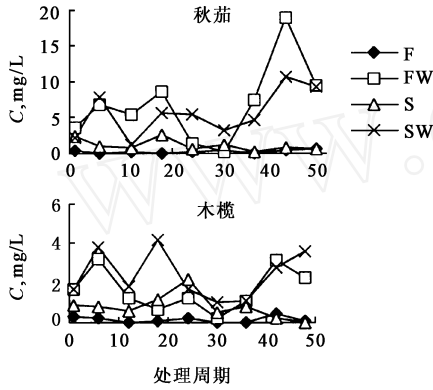


图 1 秋茄和木榄系统渗滤液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度

Fig. 1 Leachate  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentrations of *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza* systems

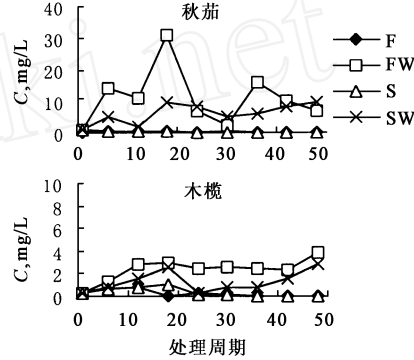


图 2 秋茄和木榄系统渗滤液  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度

Fig. 2 Leachate  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentrations of *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza* systems

2.2 土壤营养盐含量

加入废水使土壤可提取性无机 N 明显增加但土壤总 N 含量无显著提高(表 2). 废水处理组木榄和秋茄系统土壤总 N 含量仅增加 0.04 mg/g,淡水条件下两种红树林系统废水处理组土壤无机 N 含量为对照组的 2 倍多;海水条件下的增加值则较低(木榄和秋茄系统废水处理组分别为对照组的 2.03 和 1.37 倍). 土壤无机 N 占总 N 的比例很小,对照组为 0.8%—1.2%,废水处理组为 1.5%—2.6%. Wong 等亦发现经废水处理的深圳红树木土壤无机 N 占总 N 的比例仅 0.6%—1.6%<sup>[7]</sup>. 土壤 P 营养盐含量无论是总 P 还是可提取的无机 P 均由于废水的加入而显著提高(表 2):淡水条件下木榄和秋茄系统废水处理组土壤可提取性无机 P 分别为对照组的 6.87 和 574 倍,海水条件下分别为 6.75 和 5.50 倍;淡水条件下木榄和秋茄系统废水处理组土壤总 P 分别为对照组的 2.34 和 1.93 倍,海水条件下分别为 2.43 和 2.16 倍.

表 2 废水和盐度对秋茄和木榄系统土壤特性影响的双因素变量分析

Table 2 Results of 2 way ANOVA for the effects of livestock wastewater discharge and salinity on soil properties of *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza* systems

参数	秋茄系统			木榄系统		
	盐度(S)	废水(W)	S × W	盐度(S)	废水(W)	S × W
可提取性无机 N	2.98	11.15 *	3.38	0.16	21.95 ***	0.04
可提取性无机 P	0.21	23.86 ***	0.13	3.79	564.02 ***	2.29
总 N	0.08	0.34	0.00	0.03	2.78	0.06
总 P	0.03	30.40 ***	0.74	0.09	89.49 ***	0.09

注:列出 F 值, \* ( $p < 0.05$ ), \*\* ( $0.05 < p < 0.01$ ), \*\*\* ( $p < 0.005$ )

2.3 植物体 N 和 P 含量

木榄和秋茄系统废水处理组植物体 N、P 含量比对照组有极显著提高(表 3). 废水处理组各植物器官 N 含量均为淡水条件比海水条件略高:淡水废水处理组木榄和秋茄叶片 N 含量分

别为 1.651 %和 2.064 % ,相应的对照值为 1.008 %和 1.516 % .海水废水处理组木榄和秋茄叶片 N 含量分别为 1.409 %和 1.933 % ,相应的对照值为 1.028 %和 1.422 % .这些结果与前人的研究结果类似<sup>[1,4]</sup> .然而 ,废水处理组根系 N 含量与对照值相比差异很小 ,说明两种植物吸收的 N 主要累积于地上部 .盐度对植物 N 含量无显著影响 .

表 3 废水和盐度对秋茄和木榄植物体总 N 和总 P 影响的双因素变量分析

Table 3 Results of 2 way ANOVA for the effects of livestock wastewater discharge and salinity on total N and total P contents in *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*

参数	组分	秋茄			木榄		
		盐度(S)	废水(W)	S ×W	盐度(S)	废水(W)	S ×W
总 N	根	0.12	0.52	0	0.44	9.16 *	4.97
	茎	1.75	34.22 ***	12.17	2.09	45.21 ***	4.98
	叶	1.31	28.91 ***	0.04	3.02	64.66 ***	4.21
总 P	根	17.66 ***	154.47 ***	17.26 ***	0.42	24.09 ***	0.07
	茎	1.47	14.54 **	1.53	29.46 ***	96.70 ***	21.14 ***
	叶	1.73	16.52 ***	0.22	33.83 ***	100.23 ***	36.08 ***

注:列出 F 值, \* ( $p < 0.05$ ) , \*\* ( $0.05 < p < 0.01$ ) , \*\*\* ( $p < 0.005$ )

红树植物 P 含量普遍较低<sup>[13]</sup> .本研究木榄和秋茄 P 含量对照值 0.28 —0.77 mg/g ,但废水处理组 P 含量比对照组增加 1 —4 倍 ,高于 N 含量增加倍数(0.04 —1.30 倍) .废水的加入不但使两种植物叶和茎的 P 含量增加 ,根系 P 含量也显著增加(表 3) .对于秋茄 P 含量而言 ,盐度和废水在根部有相互作用而在叶和茎无相互作用 .海水条件下废水处理组根部 P 含量比对照组的增加量远高于淡水条件下的增加量 .对木榄 P 含量而言 ,盐度和废水的相互作用出现于叶和茎 ,而在根部无这种作用 .淡水条件下废水处理组木榄叶和茎 P 含量比对照组的增加量远高于海水条件下的增加量 .

2.4 废水 N、P 处理效率

大多数滞留于系统的废水营养盐由土壤去除(表 4) ,这与前人的结果类似<sup>[6,7]</sup> .但需要指出的是 ,由于本试验时间较短 ,废水营养盐多被土壤吸附 ,当处理时间很长时由于土壤营养盐

表 4 木榄和秋茄系统废水营养盐的质量平衡(单位:mg)

Table 4 Mass balance of nutrient from livestock wastewater discharged into *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza* systems (unit :mg)

项目	组分	N				P			
		秋茄		木榄		秋茄		木榄	
		0 *	30 *	0	30	0	30	0	30
加入量		515	492	515	492	770	769	770	769
滤出量		81	36	23	10	160	92	63	17
滞留量		434	456	492	482	610	677	707	752
植物吸收量	根	4	4	28	4	12	25	8	9
	茎	34	9	67	31	4	2	10	3
	叶	39	39	203	108	3	2	9	2
	凋落物	20	8	29	6	1	0	1	0
	小计	96	59	326	149	20	29	28	14
土壤去除量		338	397	166	333	590	648	679	738
对照组土壤含量		1033	1067	1024	990	581	554	509	512
废水处理组土壤含量		1129	1259	1113	1108	1124	1201	1197	1250
土壤累积量		96	192	89	118	543	647	688	738
累积量/去除量		28.4 %	48.4 %	53.6 %	35.4 %	92.0 %	99.8 %	101.3 %	100.0 %

\*0 和 30 为处理盐度

达饱和,植物的吸收则显得较为重要,这需进一步的试验证明.一些 N 可能通过反硝化作用以气体的形式逸散于空气中,因而导致 N 质量平衡较大的误差;滞留于土壤的 P 逸散于系统外的机会很小,因而 P 质量平衡的误差很小.

表 5 木榄和秋茄系统对废水营养盐的处理效率( % )

Table 5 Treatment efficiency ( % ) for livestock wastewater nutrients by *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza* systems

子系统	组分	N				P			
		秋茄		木榄		秋茄		木榄	
		0 *	30 *	0	30	0	30	0	30
植物体	根	0.7	0.7	5.4	0.8	1.6	3.2	1.0	1.1
	茎	6.6	1.8	13.0	6.3	0.5	0.3	1.3	0.4
	叶	7.5	7.8	39.4	22.0	0.3	0.3	1.1	0.3
	凋落物	3.8	1.6	5.6	1.2	0.2	0.1	0.2	0.0
	小计	18.7	12.0	63.4	30.3	2.6	3.8	3.6	1.9
土壤		65.6	80.7	32.2	67.6	76.6	84.2	88.2	95.9
总计		84.3	92.7	95.5	98.0	79.2	88.0	91.8	97.8

\*0 和 30 为处理盐度

木榄系统和秋茄系统牲畜废水 N 营养盐去除率在淡水条件下为 95.5 %和 84.3 %,海水条件下则为 98.0 %和 92.7 %;P 营养盐去除率在淡水条件下为 91.8 %和 79.2 %,海水条件下则为 97.8 %和 88.0 %(表 5). 普遍应用于废水处理的高等植物芦苇吸收废水 N 营养盐的比例不超过 9 %<sup>[14]</sup>,低于本研所得红树植物的吸收比例:木榄和秋茄淡水条件下分别为 63.4 %和 18.7 %,海水条件下分别为 30.3 %和 12.0 %. 陈桂珠等得出盐度 15 时秋茄吸收人工废水 N 的比例 12.7 %<sup>[6]</sup>,与本研究淡水和海水(盐度为 0 和 30)条件下秋茄的结果类似,即盐度对秋茄吸收废水 N 无显著影响.木榄吸收废水 N 的能力高于秋茄且盐度对木榄 N 吸收有负影响.两种植物两个盐度叶片均为吸收废水 N 的重要器官.

参考文献:

- [ 1 ] Clough B F,Boto K G,Attwill P M. Mangrove and sewage:a reevaluation[A]. In: Teas H J (ed. ). Biology and Ecology of Mangroves. Tasks for Vegetation Science Series Vol. 8[C], Dr W. Junk Publishers, Lancaster. 1983, 151 —162
- [ 2 ] Corbitt R A,Bowen P T. Constructed wetlands for wastewater treatment[A]. In: ( Kent DM ed. ), Applied Wetlands Science and Technology[C]. Lewis Publishers. 1994. 221 —242
- [ 3 ] Breaux A S, Farber S, Day J. Using natural coastal wetlands systems for wastewater treatment: an economic benefit analysis [J]. J. Envir Mgmt, 1995, 44: 285 —291
- [ 4 ] Boto K G, Wellington J T. Nitrogen and phosphorus nutritional status of a northern Australian mangrove forest [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1983, 11: 63 —69
- [ 5 ] Lin P. Mangrove Ecosystem in China [M]. Beijing: Science Press, 1999. 11 —34
- [ 6 ] 陈桂珠, 缪绅裕, 黄玉山, 等. 人工废水 N 营养盐在模拟秋茄湿地系统中的分配、循环与去除[J]. 环境科学学报, 1996, 16: 44 —50
- [ 7 ] Wong Y S, Tam N F Y, Lan C Y. Mangrove wetlands as wastewater treatment facility: a field trial[J]. Hydrobiologia, 1997, 352: 49 —59
- [ 8 ] Naidoo G. Effects of nitrate, ammonium and salinity on growth of the mangrove *Bruguiera gymnorrhiza* (L.) Lam[J]. Aquatic Botany, 1990, 38: 209 —219
- [ 9 ] Cole D W. Soil nutrient supply in natural and managed forests[J]. Plant and Soil, 1995, 168 —169: 43 —53
- [ 10 ] 郑德璋, 廖宝文. 海南清澜港和东寨港红树林及其生境的调查研究[J]. 林业科学研究, 1989, 2: 433 —441
- [ 11 ] 蓝福生, 李瑞棠, 陈平, 等. 广西海滩红树林与土壤的关系[J]. 广西植物, 1994, 14: 54 —59
- [ 12 ] Allen S E, Grimshaw H W, Parkinson J A *et al.* Chemical Analysis of Ecological Materials[M]. Oxford: Blackwell Scientific publications. 1974. 25 —302
- [ 13 ] Salcedo I H, Medeiros C. Phosphorus transfer from tropical terrestrial to aquatic systems: mangroves [A]. In: Tiessen H (Ed. ), Phosphorus in the global environment [C] John Wiley & Sons Ltd. 1995. 347 —362
- [ 14 ] Obarska-Pempkowiak H. Seasonal variations in the efficiency of nutrient removal from domestic effluent in a quasi-natural field of reeds (*Phragmites australis*) [A]. In: Etnier C, Guterstam B (Eds. ), Ecological Engineering for wastewater treatment [C], CRC Press, Inc. 1997. 207 —216